

# Análisis del control trapezoidal con y sin realimentación de sensor para motores BLDC usando el kit de desarrollo TMDSHVMTRPFCKIT de Texas Instruments.

Celia Casanova M.<sup>(1)</sup>, Alberto Larco G.<sup>(2)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
[casanovacelia@hotmail.com](mailto:casanovacelia@hotmail.com)<sup>(1)</sup>, [dlarco@espol.edu.ec](mailto:dlarco@espol.edu.ec)<sup>(2)</sup>

## Resumen

*En el presente informe se analiza el módulo TMDSHVMTRPFCKIT usando los algoritmos de control desarrollados por el fabricante y los componentes necesarios para su estudio; los mismos que son puestos a prueba para determinar experimentalmente su funcionamiento haciendo uso de la documentación proporcionada por fabricante y la investigación necesaria para su desarrollo. Inicialmente se identifican las diferentes partes del equipo para conocer cuales utilizaremos en la ejecución de este proyecto; se analizan las funciones que cumplen cada parte, su comportamiento, desempeño y alcance. Nos familiarizamos con el software de control, para proceder a realizar las diferentes pruebas. Se utiliza el método de compilación incremental para realizar pruebas experimentales a cada parte del sistema de manera independiente, siguiendo una secuencia hasta utilizar completamente el sistema. Como resultado de las pruebas podemos comprobar la validez y funcionamiento correcto de la técnica de control trapezoidal, estas pruebas y resultados pueden ser incorporados en estudios adicionales donde se implemente partes individuales o la totalidad del módulo.*

**Palabras Clave:** Control Trapezoidal, Compilación Incremental, Algoritmos de Control.

## Abstract

*This report analyzes the TMDSHVMTRPFCKIT module using the control algorithms developed by the manufacturer and the components needed for study; thereof which are experimentally tested to determine its operation using the documentation provided by the manufacturer and the research necessary to its development. Initially the different pieces of equipment are identified to meet use in the execution of this project; the roles each party, behavior, performance and range are analyzed. We became familiar with the control software, to proceed with different tests. Incremental compilation method used for experimental testing each part of the system independently, in sequence to fully utilize the system. As a result of the tests can check the validity and correct operation of the trapezoidal control technique, these tests and results can be incorporated in further studies where individual parts or the entire module is implemented.*

**Keywords:** Trapezoidal Control, Incremental Compilation, Control Algorithms.

## 1. Introducción.

El kit TMDSHVMTRPFCKIT es esencialmente una plataforma de desarrollo fabricada por la compañía TEXAS INSTRUMENTS® para la evaluación del micro controlador embebido en la tarjeta Piccolo (usado en este proyecto) y demás circuitería con la que funcionan en conjunto en la tarjeta HVDMC (High

Voltage Digital Motor Control), este kit nos permite experimentar con las diferentes técnicas de control digital aplicadas a los motores BLDC, ACI y PMSM convirtiéndolo en un equipo idóneo para el desarrollo e investigación.

El kit de desarrollo adquirido consta de las siguientes partes en hardware:

- Tarjetas de control: F28035 (Piccolo) y F28335 (Delfino) respectivamente.
- Tarjeta DMC de alto voltaje.
- Fuente de poder de 15V DC.
- Diferentes cables de poder.
- Cables: banana (para interconexión de etapas) y de comunicación USB (B a A).

El software incluido consta de dos programas:

ControlSUITE™, es un programa donde podemos encontrar toda la documentación y ejemplos necesarios, es básicamente una herramienta para minimizar el tiempo de desarrollo.

Code Composer Studio™, es un programa que se utiliza para el desarrollo y depuración de aplicaciones en un entorno de C/C++, existen software de desarrollo con entorno gráfico que nos facilitarían el trabajo, entre ellos tenemos a MATLAB®, POWERSIM y VisSIM, sin embargo se utiliza el entorno de C.

Además de la importación del kit, también se importó uno de los tres motores con los que funciona el kit, se escogió el motor BLDC para el desarrollo de este proyecto como se muestra en la Figura 1.

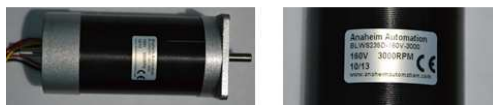


Figura 1. Motor BLDC sin escobillas.

Este motor tiene incorporados sensores de efecto Hall que permiten la operación del mismo, en la Figura 2 se muestran dichos sensores.



Figura 2. Sensores de efecto Hall.

## 2. Análisis del motor BLDC

El motor DC sin escobillas es básicamente un tipo de motor sincrónico que tiene en su rotor imanes permanentes para generar flujo y una fuerza contra electro motriz (back EMF) de forma trapezoidal. Además consta físicamente por otras partes como su estator que esta formado por un núcleo laminado y su respectivo devanado, en la Figura 3 se observa el despiece del motor.

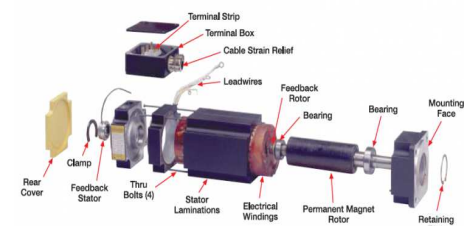


Figura 3. Despiece del Motor BLDC [1].

### 2.1. Principio de Funcionamiento del Motor BLDC.

Fundamentalmente el principio de operación del motor BLDC consiste en lograr una adecuada secuencia de energización de los devanados; internamente las bobinas de este motor se encuentran conectadas como se muestra en la Figura 4 (motor elemental).

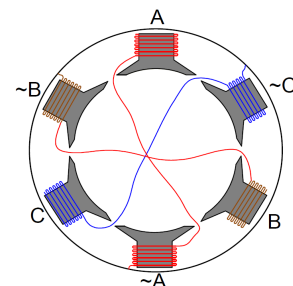


Figura 4. Devanados internos del motor BLDC (motor elemental).

Esta conexión muestra que internamente las colas de bobina se encuentran conectadas a un mismo punto llamado punto neutro, esto permite un adecuado uso de las fases para producir torque, en la Figura 5 se muestra la secuencia de energización correcta para producir torque constante, se observa además que con dicha secuencia se hace un buen uso del devanado ya que debido a la existencia del punto neutro dos fases son energizadas al mismo tiempo todo el tiempo.

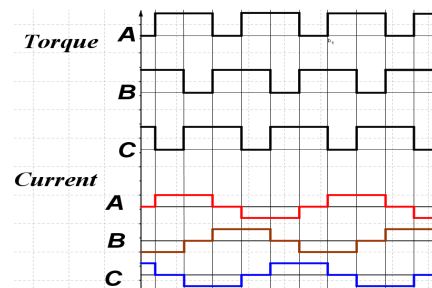


Figura 5. Gráficos de torque y corriente considerando una secuencia de energización de fases apropiada.

Considerando que la fuente de energía a usar es una barra DC generada por medio de un puente rectificador y demás circuitería es necesario un convertidor que permita realizar tal cosa, para ello se hace uso de un puente inversor como el que se muestra en la Figura 6.

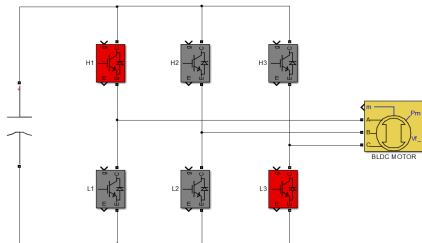


Figura 6. Puente Inversor Driver.

## 2.2. Aspectos generales del control trapezoidal aplicados al motor BLDC.

Para efectuar el control trapezoidal es necesario implementar la secuencia descrita anteriormente en algún tipo de controlador como puertas lógicas, micros controladores, microprocesadores, FPGA, DSP etc. En este proyecto se usa el MCU TMS320F28035 embebido en la tarjeta de control Piccolo de Texas Instruments, para implementar este procedimiento es necesario que el sistema obtenga exactamente la posición del rotor para saber que transistores encender en cada momento; el kit de Texas Instruments nos proporciona dos posibilidades; la primera es usando realimentación por medio de sensores Hall como se representa en la Figura 7 y la segunda sin realimentación de sensor representado en la Figura 8.

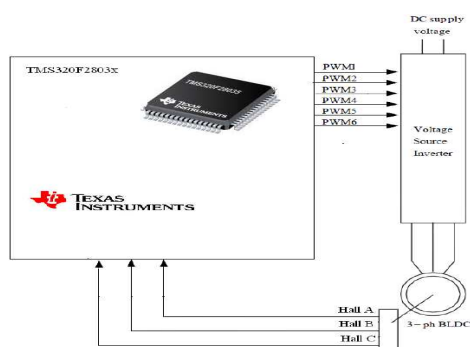


Figura 7. Sistema implementado con realimentación de sensores Hall.

Para el sistema con realimentación de sensores hall, el algoritmo proporcionado por el fabricante interpreta los pulsos emitidos por los sensores para calcular la

posición del rotor, mientras que en el método sin realimentación de sensor el algoritmo usa las fuerzas contra electromotrices para efectuar el control

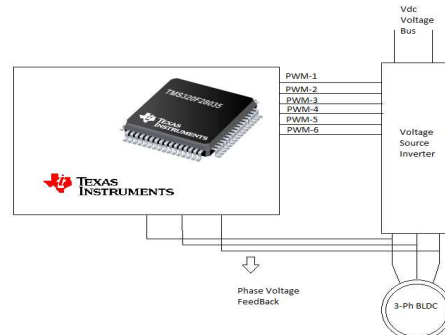


Figura 8. Sistema implementado sin realimentación de sensores Hall.

## 3. Pruebas experimentales para el control trapezoidal de motores BLDC.

En las pruebas realizadas, el sistema de control de velocidad se somete a pruebas de desempeño. El motor BLDC es accionado a través del VSI (Voltaje Source Inverter), para esto la MCU utiliza señales PWM que comandan el inversor; para efectos de control de corriente esta es censada en el retorno del bus DC (Current Feedback) y es enviada al TMS320x2803x a través de convertidores analógico-digital (ADC's); en la Figura 9 se muestra un esquema de la implementación del sistema de control de un motor BLDC.

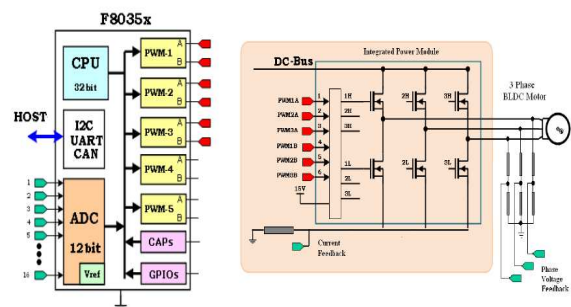


Figura 9. Esquema general del sistema [6].

### 3.1. Pruebas experimentales utilizando el sistema de compilación incremental para el control trapezoidal con y sin realimentación de sensores Hall.

El sistema de compilación incremental, es una forma de depuración gradual, es decir, que

progresivamente se van introduciendo partes del sistema, (módulos) hasta formar el sistema completo, su objetivo es verificar paso a paso el funcionamiento de cada módulo utilizado, la información de estas pruebas se las puede encontrar en [7].

Para ambas pruebas (con y sin realimentación de sensores hall) los tres primeros niveles de compilación son idénticos pues solo tratan el funcionamiento general del sistema que es común para ambos.

### 3.1.1. Niveles de compilación.

En los niveles son muy básicos se describen los pasos mínimos para comprobar el funcionamiento del sistema de interrupciones y el funcionamiento del motor en lazo abierto, utilizan módulos independientes (ligados netamente al SW) y dependientes (ligado al HW y al SW), la representación gráfica del primero de los niveles de compilación se muestra en la Figura 10 (los bloques mostrados solo son representaciones gráficas de las macros usadas pues cabe mencionar que el programa usado, propuesto por el fabricante, se encuentra en lenguaje C más no en algún lenguaje de programación gráfico)

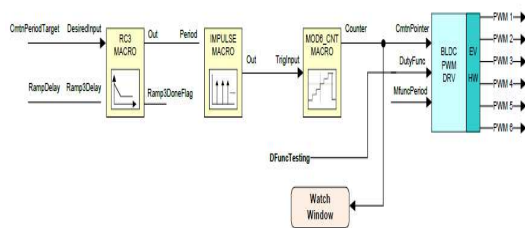


Figura 10. Representación en diagrama de bloques del sistema correspondiente al nivel de compilación 1 [6].

En el sistema el bloque BLDC PWM DRV es el encargado de manejar el VSI (como se observa tiene seis salidas PWM, una para cada Mosfet del VSI) dentro de su programa se encuentra la secuencia de energización de los devanados la cual comprende seis estados (cada estado corresponde a dos Mosfet encendidos de los seis que posee el inversor) solo necesita recibir en su entrada CmtnPointer el valor de un contador (MOD6\_CNT) para energizar los transistores correspondientes al estado que apunte el contador, a su vez este contador incrementa su valor cada vez que recibe un impulso en su entrada, a lo largo de las pruebas siempre se usara la macro IMPULSE para generar los impulsos, esta macro solo necesita recibir en su entrada el periodo deseado para las pulsaciones, en la Figura 11 se muestran dos de las señales mencionadas.

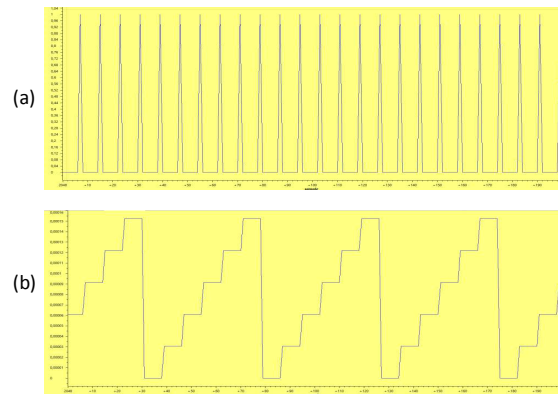


Figura 11. (a) Señal de salida del módulo IMPULSE (b) Señal de salida del módulo MOD6\_CNT.

Se observa que por cada impulso el valor del contador se incrementa y al final vuelve a su valor inicial para repetir el ciclo otra vez.

Para manejar el VSI el bloque BLDC PWM utiliza la técnica de troceo suave, “soft chopping” para manejar el inversor, esta técnica consiste en modular por ancho de pulso únicamente la señal del mosfet superior en el puente inversor mientras que el inferior carece de modulación es decir enciende totalmente, ver Figura 12, esta modulación es la que permite controlar el flujo de energía a través del convertidor controlando así la velocidad del motor, la variable que controla el ciclo de trabajo es DutyFunc como se observa en la Figura 10.

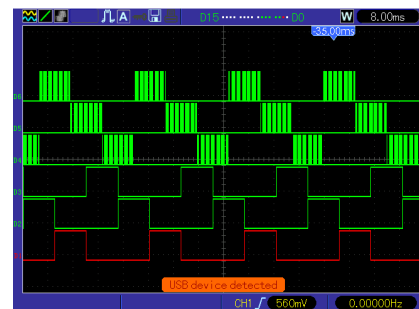


Figura 12. Oscilograma de las seis señales que corresponden a las compuertas de los IGBT del módulo inversor.

Por otro lado la variable CmtnPointer es la que controla los cambios de estado, estos cambios de estado deben estar sincronizados con la posición del rotor, es decir, debe mantenerse sin importar la velocidad a la que opere el motor, en el motor DC convencional esta sincronización estaba anclada mecánicamente por el sistema colector y de escobillas,

el motor BLDC al carecer de las misma debe mantener esta sincronización electrónicamente.

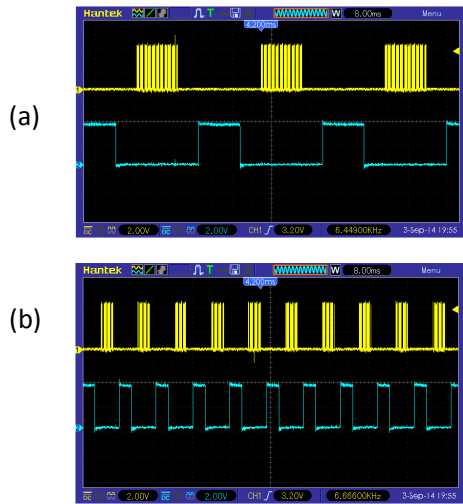


Figura 13. Oscilograma de las señales de las compuertas 1H y 1L (Q1 & Q2 respectivamente) (a) baja frecuencia (b) alta frecuencia.

Para mantener esta sincronización se usa un lazo de control de sincronismo el cual para funcionar necesita información precisa sobre la posición del rotor, dicha información se puede obtener evaluando las f.e.m. (control trapezoidal sin realimentación de sensores de efecto hall) o a su vez utilizando los sensores de efecto hall para dicho propósito, los esquemas para ambos experimentos se muestran en las Figuras 14 y 15.

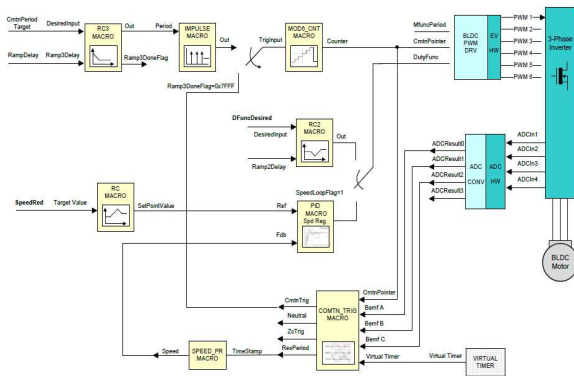


Figura 14. Diagrama de bloques correspondiente al nivel de compilación 6 [6].

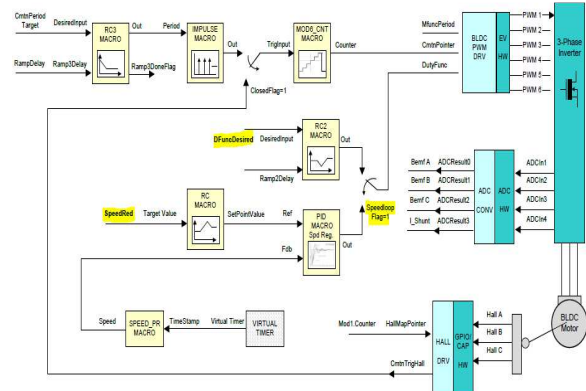


Figura 15. Diagrama de bloques correspondiente al nivel de compilación 5 con realimentación de sensores de efecto Hall [7].

Se observa una diferencia fundamental en el lazo de sincronismo, mientras en la Figura 14 se utiliza el ADC para ingresar las señales de b.e.m.f. al sistema y a través del bloque CMTN\_TRIG\_MACRO controlar los cambios de estado del contador (y con ello la frecuencia de los cambios de estado de acuerdo a la posición del rotor) en la Figura 15 la señal que compone el lazo de sincronismo es la emitida por el conjunto de sensores Hall procesada por el bloque HALL\_DRV antes de entrar a gobernar el contador. En ambos experimentos (con y sin realimentación de sensor) se utiliza un lazo de control PID de velocidad que siempre actúa sobre la variable DutyFunc (controlando a través del ciclo de trabajo el flujo de potencia del suministro hacia la carga).

Es posible en vez de utilizar un lazo de control de velocidad utilizar uno de control de corriente como se realiza en un nivel de compilación previo, el problema de este lazo es que al mantener la corriente constante y por ende un torque constante el motor siempre debe tener carga ya que de lo contrario se embalaría hasta llegar al límite que resulta en la pérdida de sincronismo, en la Figura 16 se muestra dicho lazo.

La corriente que ingresa al lazo a través del bloque ADC es tomada de las resistencias shunt dentro del hardware del módulo.



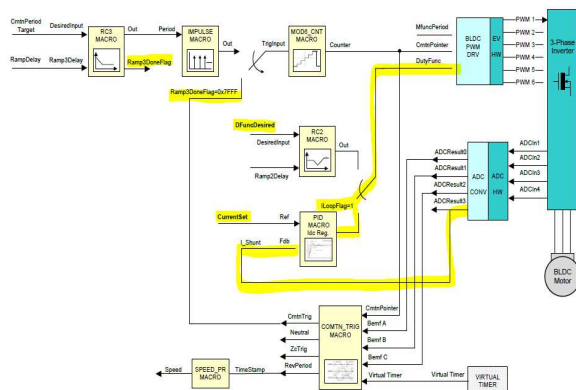


Figura 16. Diagrama de bloques correspondiente al nivel de compilación 5, lazo de control de corriente [6].

#### 4. Conclusiones.

Basándose en los resultados del trabajo realizado se concluye lo siguiente:

- Las prácticas realizadas con y sin realimentación de sensores de efecto Hall demuestran que dentro de los parámetros normales de operación no existen diferencias relevantes en el funcionamiento del motor, aunque el algoritmo de control sea distinto.
- Por medio de los oscilogramas y gráficos del sistema (obtenidos mediante Code Composer Studio) comprobamos que los resultados obtenidos en las prácticas realizadas con el kit cumplen fielmente con las pruebas propuestas por el fabricante demostrando que la operación del sistema es válida.
- Cada vez que modificamos el valor de SetPoint de velocidad (SpeedRef), es visible que el sistema estabiliza la velocidad del motor a la velocidad de referencia.
- En el sistema de control de torque para ambos experimentos se comprobó que a velocidades excesivas se producen fallas en el lazo de sincronismo; visiblemente el motor vibra y la señal Counter (obtenida mediante el osciloscopio) se distorsiona.

## 5. Agradecimiento.

A mi Dios y a mi amada familia, que con su amor, dedicación, comprensión, ejemplo y apoyo me

inspiraron a creer, esforzarme cada día más, a imponerme metas y no desfallecer.

## 6. Referencias

- [1]. C2000 System and Applications Team, “High Voltage Motor Control and PFC (R1.1) Kit Hardware Reference Guide,” [En Línea]. Texas Instruments. Disponible en:  
[ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy\\_FT\\_P-10-30-12/controlSUITE/development\\_kits/HVMotorCtrl+PfcKit\\_v2.0/~Docs/HVMotorCtrl+PFC\\_HWGuide.pdf](ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy_FT_P-10-30-12/controlSUITE/development_kits/HVMotorCtrl+PfcKit_v2.0/~Docs/HVMotorCtrl+PFC_HWGuide.pdf)
- [2]. ISL Information Blog, “How do brushless dc motors work?,” [En Línea]. Disponible en:  
<http://www.islproducts.com/isl-blog/entry/how-do-brushless-dc-motors-work.html>.
- [3]. Digital Pimple, “Brushless DC Motor & Control - How it Work (Part 1 of 2),” [En Línea]. Disponible en:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ZAY5JInyHXY>.
- [4]. C2000 Systems and Applications Team, “Software Library: F2803x Drivers,” [En Línea]. Texas Instruments, Inc 2012. Disponible en:  
[ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy\\_FT\\_P-10-30-12/controlSUITE/libs/app\\_libs/motor\\_control/drivers/f2803x\\_v2.0/~Docs/DMC2803x\\_DRV.pdf](ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy_FT_P-10-30-12/controlSUITE/libs/app_libs/motor_control/drivers/f2803x_v2.0/~Docs/DMC2803x_DRV.pdf).
- [5]. C2000 Systems and Applications Team, “Software Library: Target Independent Math Blocks,” [En Línea]. Texas Instruments, Inc 2012. Disponible en:  
[ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy\\_FT\\_P-10-30-12/controlSUITE/libs/app\\_libs/motor\\_control/math\\_blocks/v4.0/~Docs/DMC%20MATH.pdf](ftp://ftp.ti.com/pub/dml/DMLrequest/Christy_FT_P-10-30-12/controlSUITE/libs/app_libs/motor_control/math_blocks/v4.0/~Docs/DMC%20MATH.pdf).
- [6]. Bilal Akin and y Manish Bhardwaj, “Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors,” [En Línea]. Texas Instrument, Application Report SPRABQ7, julio 2013. Disponible en:  
<http://www.ti.com/lit/an/sprabq7/sprabq7.pdf>.
- [7]. Bilal Akin and y Manish Bhardwaj, “Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors,” [En Línea]. Texas Instrument, Application Report SPRABQ6, julio 2013. Disponible en:  
<http://www.ti.com/lit/an/sprabq6/sprabq6.pdf>